



光纤光谱仪在颜色在线测量中的应用

黎国梁¹, 宋光均², 姚志湘³, 蹇华丽⁴

(1. 广西大学 化学化工学院, 广西 南宁, 530004; 2. 华南理工大学 后勤产业集团, 广东 广州, 510640; 3. 广西工学院 生物与化学工程系, 广西 柳州, 545006; 4. 华南农业大学 食品学院 广东 广州, 510642)

[摘要] CIE 统一了颜色测量的标准, 光谱仪取代了色度计等传统测色仪器成为主流。本文回顾了光谱仪器在颜色测量领域的应用进展, 阐述了其发展趋势, 即旋转光栅扫描结构的光谱仪已被全固定构件 CCD 阵列检测的光谱仪取代, 微小型光纤光谱仪成为一种新型的在线测量仪器, 具有许多优点。文中以 Ocean Optics 的光纤光谱仪为例, 详细介绍了其特点以及工业应用实例。

[关键词] 光纤光谱仪, 在线测量仪器, 颜色测量

Fiber Optical Spectrometer and Its Applications in On-line Color Measurement

LI Guoliang¹, SONG Guangjun², YAO Zhixiang³, JIAN Huali⁴

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. The Group of Logistic Industry, South China Univ. Of Tech, Guangzhou 510640, China; 3. Department of Biological Chemical Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China; 4. College of Food, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The standard of color measurement was unified by CIE. The spectrometer replaced traditional color measurement instruments such as colorimeter, becoming the mainstream. This paper reviewed the application development of spectrometers in color measurement. The trend of its development was described. The spectrometer with rotating grating and scanning structure have been replaced by another type which has no moving parts and uses CCD array for detecting. Miniature fiber optical spectrometer has many advantages as a new type of the on-line instruments. The fiber optical spectrometer that produced by Ocean Optics company was a case in point. Its traits and applications in industry were introduced detailedly.

Keywords: color measurement; on-line detecting instrument, fiber optical spectrometer

随各个行业的发展, 对工业生产商品的颜色的指标要求亦越来越高, 产品颜色差异会直接影响质量等级。在批量化生产中, 企业要确保不同批次产品的颜色指标一致, 或者保证同批次产品的颜色均一。

近年来, 国内外一些与着色有关的行业, 如: 纺织印染、染料、颜料制造、涂料、塑料着色加工以及油墨印刷等行业, 采用了计算机测色配色系统作为有色产品的开发、生产和质量控制, 使生产科学、合理、高效, 企业也在市场竞争中获得效益。与此同时, 对颜色的在线测量也提出了更为严格的要求。在颜色测量更高精度要求的基础上, 开发能满足颜色的实时测量和



控制的颜色测量系统，已经成为在线检测研究和企业质量管理共同关心的重要课题。

1 颜色测量的理论基础

物体的颜色取决于对光的选择吸收。光照射于物体，物体选择吸收某种波长范围的光，反射回其余波长的光，反映到人脑就是物体的颜色印象。早期没有统一的标准和约定，颜色科学工作者纷纷以各自的研究领域和实验数据为基础，发表过多个色差公式^[1]。但是各个公式间数据难以转换，计算结果间无法对比。1931年，CIE（国际照明委员会）将颜色的测量描述为对颜色刺激的测量，并推荐了三刺激值的计算公式^[2]，CIE标准色度系统是客观测量物体色的基础。此后CIE对标准色度系统作了补充^[3-5]，1976年正式推荐了两个改进的均匀颜色空间，即CIE1976 L*u*v*颜色空间和CIE1976 L*a*b*颜色空间，弥补了CIE1931色品图的不均匀性。随后，CIELAB颜色空间体系在工业界得到广泛应用，国际标准化组织（ISO）及许多国家的标准化组织都据此制定了各自相应的标准。

CIE体系实现了颜色的“数字化”，即使用测量仪器将物件颜色的测量转化为一系列的数据来表达，改进了工业生产中对颜色质量的控制和管理，也便于人们对颜色的精确描述和在商品交易中颜色信息的传递与交流。

2 颜色测量的方法

目前，颜色的测量方法主要有目视法、光电积分法和分光光度法三种。

2.1 目视法

目视法是一种最传统的颜色测量方法。由观察者在特定的照明条件下对产品进行目测鉴别，与CIE标准色度图比较，得出颜色参数。人眼不能准确识别微细的色彩差异，主观性大，常判断失误，而且工作效率低，目视法在工业测色中的应用已越来越少。

2.2 光电积分法

光电积分法是20世纪60年代仪器测色中常用的方法。光电积分法不是测量各个波长的色刺激值，而是在整个测量波长区间内，对被测颜色光能量进行一次性积分测量，得到三刺激值，再计算出样品的色品坐标等参数。通常用滤光片覆盖在探测器上，把探测器的相对光谱灵敏度修正成CIE推荐的光谱三刺激值。滤光片需满足卢瑟条件^[6]，以精确匹配光探测器。但在实际应用中，由于有色玻璃的品种有限，仪器不可能完全符合卢瑟条件，只能近似符合。

2.3 分光光度法

分光测色法是按CIE推荐的标准照明和观察条件下，通过测量颜色反射（透射）光谱，计算出颜色三刺激值^[7-8]，进而得出各种颜色参数。

根据光谱信号采集方式的不同，分光光度法可分为光谱扫描法和光电摄谱法^[9]。光谱扫描法是单通道测色方法，它按一定波长间隔，采用机械扫描结构，逐个波长采集光谱信号，优点是精度较高，缺点是光路和结构复杂，测量速度慢，且波长重复性差，对光源的稳定性要求高，受光源的不稳定性等因素影响显著，不适合在线测量。光电摄谱法是通过多通道光电探测器获取整个空间光谱能量的分布信息，得出全波段光谱数据。与前者相比有所改进，如：测量时间短，信噪比高，对光源稳定性要求低，不必使用机械扫描就能获取全谱数据，适用于瞬态测量。

以上三种方法中，分光光度法已经成为精确颜色测量的主要方法^[10]。



3 颜色测量的仪器

密度计间接测量了物体的吸光量,可作为颜色测量的一种工具,但不能准确地解释颜色^[11]。光电积分式测色仪器主要包括色度计和色差计,这类仪器虽然能准确测出有类似光谱功率分布的色源之间的差别,但测量精度在很大程度上取决于光探测器的光谱匹配精度,在测定三刺激值和色品坐标的绝对精度时有一定的局限性^[12]。分光测色仪是利用光谱仪对整个可见光的光谱数据,精度比密度计和色度计高,表达颜色完整,测量数据也可用于计算密度值或色度值^[13]。

3.1 光谱仪在颜色测量中的应用进展

分光测色系统的核心部分是光谱仪,随之在颜色测量领域应用的不断深入,研究者开展了大量的研究工作,根据应用的需要不断改进光谱仪器,推动了颜色测量也朝着实时,快速,精确的在线测量方向发展。

20世纪70年代前,分光测色仪采用HARDY分光光度计的传统光路和结构,此类仪器体积庞大,测定速度慢。70年代中期出现的MecbethMS2020采用闪光光源和阵列硅二极管探测,改进了结构并且大幅缩短了测量时间^[14]。到80年代后期至90年代初,采用光电摄谱法的分光测色仪得到很大发展,探测器普遍采用自扫描光电二极管阵列^[15],实现了测色过程自动化。这些早期生产的分光测色仪器存在体积大、价格高、使用条件苛刻等不足,一般只在实验室使用,不适用于工业生产线上。

许多应用领域对光谱仪器提出了新的要求,即光谱仪器的尺寸的缩小比提高其分辨率更为重要,微小型光谱仪便成了研究的热点^[16]。微机电系统、集成光学等交叉学科新技术的发展使开发模块化微小型光谱仪成为可能。在其研发过程中,主要有采用光栅作为分光元件和以干涉原理进行分光这两类仪器^[17]。Datacolor公司的SF系列仪器和日本美能达公司CM-2500d/2600d和CM-3600d等测色仪是这一时期分光测色仪向小型化发展的代表产品。

90年代以来,由于光纤具有很高的传输信息容量,可同时反映出多元成分的多维信息,这些优势相对于声电传感器而言是难以比拟的。随着光通信技术对光纤的需求增长,开发了低损耗的石英光纤,使成本降低,将光纤与光谱技术相结合的微型结构的光纤光谱仪引起了许多人的关注^[18],并在各种光谱测量及相关领域得到广泛的应用,光纤光谱仪是微型光谱仪器发展的重要方向。

3.2 微小型光纤光谱仪的特点

传统的光谱仪光学系统结构复杂(图1所示),需通过旋转光栅对整个光谱进行扫描,测量速度慢,并且还要将采来的样品经过粉碎、压片、研磨、溶解等预处理手段后,放在仪器的固定样品室内进行测量分析。与之相比,微小型光纤光谱仪有很多优点,如:重量轻,体积小,价格低(体积只有之前系统的1/1000,造价为原来的1/10),测量速度非常快,适用于在线实时检测。

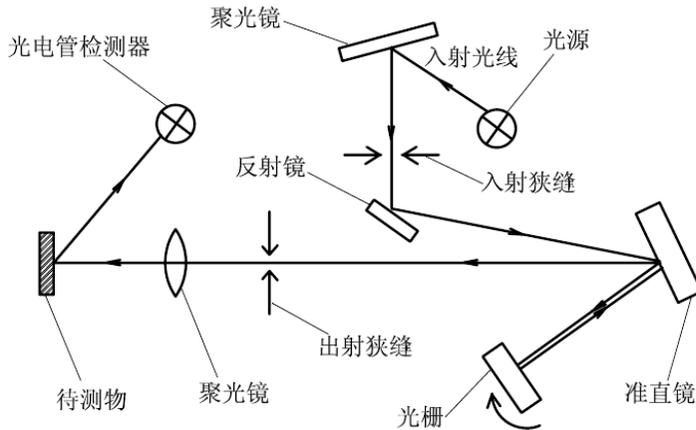


图1 传统光谱仪光学系统图

Fig.1 Optical system of traditional spectrometer

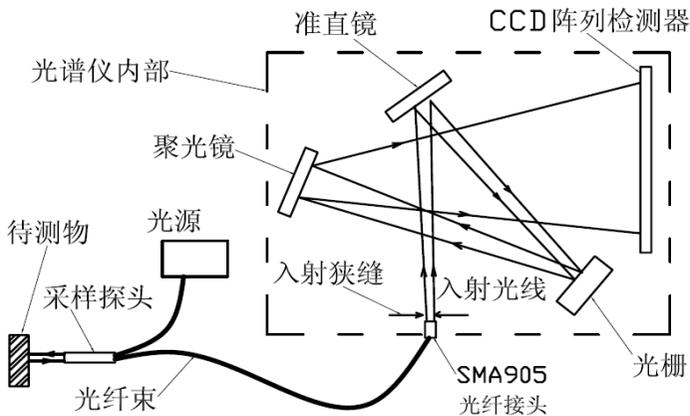


图2 微小型光纤光谱仪光学系统图

Fig.2 Optical system of miniature fiber optical spectrometer

图2为美国 Ocean Optics 公司的 Michael J. Morris 等人研制的微小型光谱仪光学系统图。光源发光通过光纤传导入采样探头，光线照射于物体表面后，反射光再经探头导入与光谱仪相连的光纤束，被测光由 SMA905 接头入射到光谱仪内。光谱仪内的光学平台设计采用交叉式 Czerny-Turner 分光结构^[19]，入射光经反射准直镜准直，平面反射式光栅分光后，将入射光分成按一定波长顺序排列的单色光，再由成像物镜聚焦后，投射到 CCD 阵列的光敏面上进行检测。整个仪器内无活动构件，光学元件都采用反射式，可在一定程度上减少象差，并使工作光谱范围不受材料影响。仪器小型化全固定件的光学设计可适应高震动、狭窄空间等复杂的工况环境检测的需要。

此外，随低损耗光纤、低噪声高灵敏 CCD 阵列检测器、全息光栅和小型高效半导体等新型光电子器件的引入，使微小型光谱仪性能明显提高，还具有以下特点：

(1) 光纤技术的引入，使待测物脱离了样品池的限制，采样方式变的更为灵活，利用光纤探头把远离光谱仪器的样品光谱源引到光谱仪器，以适应被测样品的复杂形状和位置。由光纤

引入光信号还可使仪器内部与外界环境隔绝，可增强对恶劣环境（潮湿气候、强电场干扰、腐蚀性气体）的抵抗能力，保证了光谱仪的长期可靠运行，延长了使用寿命。

(2) 以电荷耦合器件 (CCD) 阵列作为检测器，对光谱的扫描不必移动光栅，可进行瞬态采集，并通过计算机实时输出。

(3) 采用全息光栅作为分光器件，杂散光低，提高了测量精度。

光纤光谱仪系统具有模块化的特点，可根据应用的不同需要选择组件（包括各种不同类型的采样光纤探头，色散元件，聚焦光学系统和检测器等），搭建光学平台。虽然微小型光纤光谱仪的测量精度被认为低于传统的移动光栅-光电管设计的离线光度计，但已达到工业现场光谱分析的要求。

3.3 光纤光谱仪的采样附件

颜色测量必须在 CIE 规定的标准照明和几何光学条件下进行，使结果便于国际对比。市场销售和工业界实际使用的测色光谱光度计多采用 $d/0$ (实际取 $d/8$) 和 $45/0$ 几何照明条件，这两种方式有杂散光干扰小，信噪比大等优点。

当采用 $d/8$ 视场进行测量时，可使用积分球（图 3 所示）完成，它可以放在待测物的表面，测量各个位置的颜色。积分球的主要功能是作为光收集器，基本原理是光经多次反射后，均匀地散射在积分球内部，使之成为一个理想均匀的光源，探测光纤通过 SMA 接头与积分球侧面的接口相连，该接口前有一阻光挡板，避免了采样口的光直接反射进入光纤。积分球内壁由具有高反射率的漫反射材料制成，它可以在很宽的光谱范围内（250-2500 nm）具有较高的漫反射率（ $>96\%$ ）。积分球探测的主要优点在于这种测量几乎与样品表面结构无关，这对纺织品和纸张的测量特别有用，因为它们的毛面和光面有显著差别。积分球还可用于对 LED（发光二极管）的色温、色品坐标、辐射量和光通量的性能参数进行快速的检测。

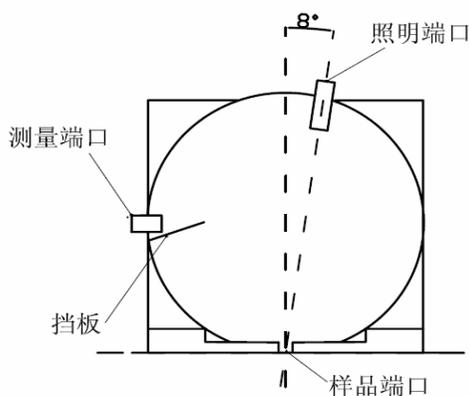


图 3 积分球结构图

Fig.3 Structure of integranting sphere

图 4 为光纤采样探头结构图，光纤束有 7 根光纤组成，通过标准 SMA905 接头，可把光源发出的光耦合进由 6 根光纤组成的光纤束中，传导到探头末端，被测表面反射回来的光进入第 7 根光纤，由这根把信号传输入光谱仪检测。光纤探头主要有反射式和透射式浸入型两类，探头的外面有保护层，使之具有耐高温和抗化学腐蚀等性能。

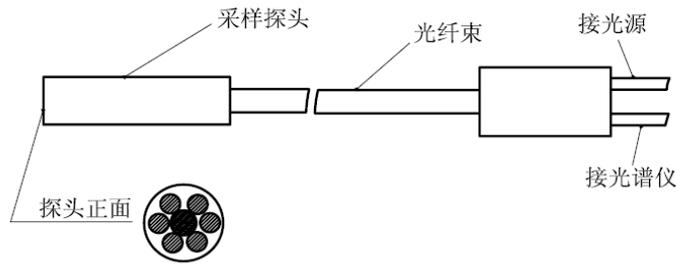


图4 光纤探头

Fig.4 Optical fiber sensor

根据实际应用场合的不同,配合相应的光纤探头及采样附件,可实现多种不同的采样方式。如:对固体表面或漆膜的颜色测量,可用反射式探头或积分球直接测量;对液体的颜色测量可使用透射式浸入型探头;若需测量在线流动的液体,可将之旁路引出,结合样品流通池进行实时测量。

另外,测量系统有配套的专业软件解决方案,按CIE规定的标准准确地进行分析。

4 在线颜色测量的工业应用

4.1 在线测量的要求

工业各部门正从以离线计量为基础的传统质量保证体系向在线过程控制质量转变,要求仪器能非接触,短时间地连续测样,并且工作现场环境复杂,对仪器整体结构要求较高。

在国内已有的各类测色仪器中,刘补生研制了一种光缆探头式在线辨色传感装置^[20],综合应用光纤和积分球技术,解决了因漫射色光光强空间分布不均匀影响测色精度的问题,但仍用滤色片和光电二极管进行分光检测,不适用于高精度、瞬态的实时监测。何帆等人利用多个LED光源和传感器单元,发明了可精确测色的小型光谱计^[21],可作为手持便携式颜色测量仪器,但测定的波长仅限于可见光范围内,不适用于生产线上产品连续出样的在线分析。

Ocean Optics公司采用高性能线性CCD阵列探测器研发的微小型光纤光谱,可以安装在一个小到足以放入手掌的光学平台(USB4000系列光谱仪的尺寸仅为89.1×63.3×34.4mm),探测器的响应波长范围为200~1100nm,响应速度极快(测量时间为13~15ms),采样附件与之组成的模块化系统能够对加工线上的产品颜色进行实时分析,适应工业在线监测的要求。

4.2 具体应用实例

许多聚合材料的制造加工过程中,希望识别最终产品的颜色。美国通用电气公司研发了用于被冷却产品的在线颜色测量系统^[22],采用颜色传感器,将光提供给分光光度计,可用于测量挤压成形后冷却产品的颜色。若系统使用光纤光谱仪进行实时监测,可大幅提高生产效率和生产线的自动控制程度。

在食品行业中,酱油、食醋、白酒、果酒的质量与在酿造流程中各种工艺参数的精确控制是分不开的,其中色度是很重要的质量指标。最终的产品抽检滞后于生产过程,不能解决在酿造过程中出现的质量问题,迫切需要进行在线监测。Pokorny等人基于白葡萄酒的颜色,使用



Ocean Optics 系列的 S2000 光纤光谱仪对品质进行检测^[23]。

与颜色测量密切相关的印染和印刷行业对产品颜色的控制标准有更高的要求。国内印染企业大多使用离线测色法,由检验人员使用色差计等仪器对产品进行检测;而在生产线上,则由经验丰富的工人目视测色,难以解决在大批量生产过程中,因细微的颜色渐变导致废品问题。国外对在线测色系统的研究较重视, Tincher 等人采用 Ocean Optics 的 SD1000 光谱仪实现了对纺织品染色的实时测量^[24]。在印刷行业的颜色实时测量和控制中,国内外已发布的多个专利提出了新方法和相应的测控系统,但其中有的检测设备仍使用传统的测色仪^[25],对改进测色仪器提出了需求,微小型光纤光谱仪在这些领域有很大的应用潜力。

5. 展望

随微小型光纤光谱仪的出现,光谱技术也经历着一场从实验室走向生产现场的革命,已转化为一种完全以被测样品为中心而设计现场仪器的实用技术。目前,各种微型光纤光谱仪产品已研发出紫外、紫外-可见光、近红外、红外和拉曼光谱等多种平台,在实际应用中大幅提高了生产效率,使在线光谱分析技术在颜色测量及相关的工业领域展现了广阔的前景。

参考文献

- [1] Robertson A.R. Historical development of CIE recommended color difference equations[J], Color Res Appl, 1990, 15: 167-170.
- [2] 薛朝华. 颜色科学与计算机测色配色实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 89-90.
- [3] Authur D.B. A critical review of the development the CIE 1931 RGB color-matching funtions[J], Color Res Appl, 2004, 29: 267-272.
- [4] Martinez J.A. Mathematical determination of numerical data corresponding to the color matching funtions of the three real observers using the RGB CIE 1931 primary system and a system of unreal primaries X' Y' Z' [J], Color Res Appl, 2003, 28: 89-95.
- [5] Trezona P.W. Derivation of the 1964 CIE 10. XYZ color-matching funtions and their applicability in photometry[J], Color Res Appl, 2003, 28: 89-95.
- [6] 魏玮. 光电积分测色中卢瑟条件限制的研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1998, 20(4): 79-81.
- [7] 徐海松, 项震. 基于 SPD 的物体色快速分光测试系统设计[J]. 光电工程, 2002, 29 (3): 39-42.
- [8] Youichi Sato, Johji Tajima, A color sheme supporting method in a color design system[J], SPIE, 1995, 2411: 25-33.
- [9] 蒋月娟. 分光测色仪的设计与研究[J]. 光学技术, 2001, 27 (3): 281-283.
- [10] 李宏光, 吴宝宁, 施浣芳. 几种颜色测量方法的比较[J]. 应用光学, 2005, 26 (3): 60-63.
- [11] 宁红娜, 倪旭翔. 彩色密度计的发展现状及趋势[J]. 光学仪器, 2003, 25 (4): 90-95.
- [12] 徐海松. 光电积分式测色仪器及荧光材料的颜色测量[J]. 印染, 2006, 7: 40-43.
- [13] 范世福. 光谱技术和仪器的新发展[J]. 光学仪器, 2000, 22(4): 36-40.
- [14] 金远同. 电脑测色配色的回顾与进展[J]. 染料工业, 1999, 36 (5): 32-36.
- [15] 徐海松. SPD 在快速自动测色中的应用[J]. 照明工程学报, 1994, 5(3): 22-28.



- [16] 大舟. 微型光谱仪[J]. 光机电世界, 1993, 10(10):39-40.
- [17] 鞠挥, 吴一辉. 微型光谱仪的发展现状[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4):372-375.
- [18] 李加, 张存洲, 朱箭等. 光纤光谱仪简介[J]. 现代科学仪器, 1998, 4: 15-16.
- [19] 蔡红星, 肖亚飞, 邵楨等. CCD 光纤光谱仪结构研究[J]. 电子测试, 2007, 8: 29-36.
- [20] 刘补生. 光缆探头式在线辨色传感装置[P]. 中国, 2048965, 1989.12.6.
- [21] 何帆, 之浩林, 约姚. 精确测定颜色的小型光谱计[P]. 中国, 1886640, 2004.11.9.
- [22] 崔幼平, 郑建晖. 用于被冷却产品的在线颜色测量系统[P]. 中国, 1471629, 2004.1.28.
- [23] Pokorny J, Filipu M, Pudil F. Prediction of odour and flavour acceptancies of white wines on the basis of their colour[J]. Nahrung, 1998, 42(6):412-415.
- [24] Tincher W.C, White E.C. Systems for Automated Analysis of Carpet Dyebaths[J]. Textile Chemist and Colorist, 1999, 31(3):17-20.
- [25] Vilar J. Printing device, carriage and color measurement method[P]. US, 453973, 2006.6.16.